

06;07;11;12

Формирование двумерной периодической структуры локальных областей плавления на поверхности кремния при импульсном световом облучении

© Я.В. Фаттахов, М.Ф. Галяутдинов, Т.Н. Львова, И.Б. Хайбуллин

Казанский физико-технический институт РАН,
420029 Казань, Россия

(Поступило в Редакцию 19 мая 1997 г.)

Приведены первые результаты формирования двумерной периодической структуры локальных областей плавления на поверхности кремния при импульсном световом облучении. Установлены условия и обсуждается механизм образования таких структур.

Один из интересных физических эффектов, наблюдающихся при взаимодействии импульсов мощного оптического излучения с поверхностью полупроводников, — это эффект анизотропного локального плавления. Суть его заключается в следующем. При однородном облучении полупроводника импульсом когерентного [1,2] или некогерентного [3–6] света (с плотностью мощности, обуславливающей нагрев до температур вблизи порога плавления) на поверхности образца образуются локальные области плавления. Эти области для монокристаллического полупроводника, например кремния, имеют строго ограниченную, правильную геометрическую форму, которая однозначно связана с кристаллографической ориентацией поверхности. Расплавленные области разделены участками нерасплавившегося материала. Размеры расплавленных областей, соотношение между расплавленными и нерасплавленными материалом определяются длительностью и плотностью мощности импульса излучения.

На сегодня эффект локального плавления монокристаллического кремния рассмотрен во многих работах, накоплен достаточно богатый экспериментальный материал и предложен ряд моделей для объяснения механизма и основных закономерностей этого эффекта [1–6]. В частности, установлено, что преимущественными центрами зародышеобразования локальной жидкой фазы являются дефекты структуры, существовавшие до светового облучения или введенные самим световым импульсом непосредственно в процессе воздействия [1,3,5,6].

Поскольку исходные или радиационно-наведенные дефекты структуры располагаются по поверхности образца, как правило, случайным образом, то и возникающие области локального плавления распределяются по поверхности хаотично. Поэтому практически невозможно предсказать ни их плотность (количество на единицу площади), ни пространственное расположение на поверхности образца.

Между тем при целенаправленном использовании этого эффекта для решения целого ряда практических задач необходимо уметь формировать локальные области плавления в заданном месте полупроводниковой пластины, подавляя при этом зарождение случайно расположенных областей плавления.

В настоящей работе приведены первые результаты, демонстрирующие возможность формирования правильной двумерной периодической структуры локальных областей плавления. С этой целью пластины монокристаллического кремния ориентации (100) и (111) были предварительно имплантированы ионами фосфора через тонкую металлическую сетку. Размер ячейки сетки $40 \times 40 \mu\text{m}$, диаметр проволоки $\sim 10 \mu\text{m}$. Энергия и доза имплантации ($E = 40 \text{ keV}$ и $\Phi = 3.12 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$) были выбраны таким образом, чтобы аморфизованный слой начинался непосредственно от поверхности образца. В результате этого на поверхности формируются аморфные ячейки, ограниченные сеткой монокристаллического кремния.

Импульсное световое облучение в режиме локального плавления проводилось излучением трех ксеноновых ламп. Плотность мощности излучения (и соответственно длительность импульса) были выбраны с учетом толщины аморфного слоя и размера ячейки металлической сетки.

На рис. 1, а приведена поверхность кремния, подвергнутого импульсному световому облучению в режиме локального плавления. Правая часть этого образца предварительно была имплантирована ионами фосфора через сетку. Левая часть в процессе имплантации была закрыта сплошной кремниевой маской. Видно, что на левой части образца локальные области плавления расположены "случайным" образом. На правой части локальные области плавления располагаются строго на проимплантированных участках пластины. Они разделены полосами нерасплавившегося монокристаллического кремния, находившимися в процессе имплантации под металлической сеткой.

Полученные результаты могут быть объяснены следующим образом на основе предложенной нами модели локального плавления аморфизованного кремния [7] при импульсном световом облучении. Толщина аморфного слоя по данным эллипсометрии при использованном режиме имплантации составляет $\sim 1000 \text{ \AA}$. Во время действия светового импульса по мере нагрева имплантированного образца до некоторой температуры локального плавления происходит твердофазная эпитаксиальная рекристаллизация аморфного слоя от границы с

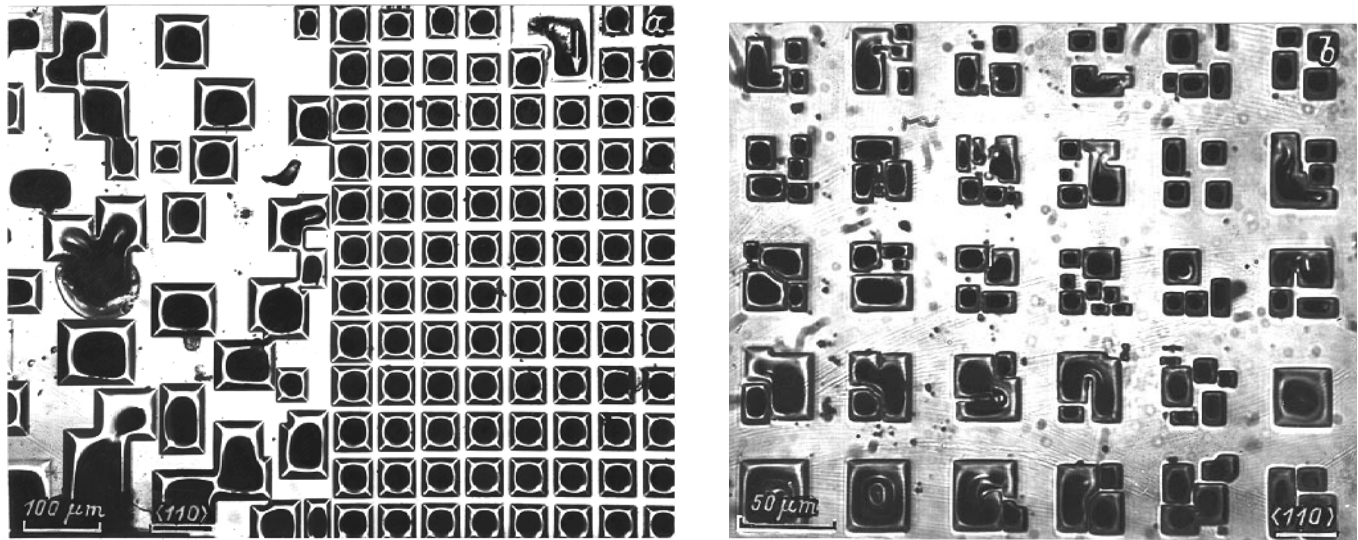


Рис. 1. Поверхность образца кремния ориентации (100), подвергнутого импульсному световому облучению в режиме локального плавления ($\tau_l = 0.14$ s). *a* — монокристаллический кремний (слева); кремний, имплантированный ионами P^+ через металлическую сетку (справа). Плотность мощности излучения 1200 W/cm^2 ; *b* — кремний, также имплантированный через сетку, но облученный при меньшей плотности мощности светового излучения ($\sim 1100 \text{ W/cm}^2$).

ненарушенной подложкой. Как показали наши оценки, выполненные с применением температурной зависимости скорости рекристаллизации для Si [8] к моменту достижения на поверхности образца температуры, близкой к температуре плавления аморфного кремния, приповерхностный слой может остаться в аморфном состоянии. Как известно [9,10], температура плавления аморфного кремния существенно (на 200–600 K) ниже температуры плавления монокристалла. Поэтому начальная стадия локального плавления протекает в аморфной среде. При этом происходит формирование локальной переохлажденной жидкости, а именно проимплантированная ячейка размером $40 \times 40 \mu\text{m}$ при нагреве до температуры плавления аморфного кремния начинает плавиться неоднородно по поверхности. На ней зарождаются несколько отдельных локальных областей плавления (рис. 1, *b*), которые затем за время действия светового импульса растут и сливаются в конечном счете в одну область локального плавления. Сетка монокристаллического кремния при этом не плавится и ограничивает распространение жидкой фазы пределами аморфной ячейки.

Следует также отметить еще два фактора, которые стимулируют опережающее расплавление аморфизованных участков кремния, по сравнению с монокристаллическими. Во-первых, коэффициент поглощения аморфного кремния для используемого светового излучения существенно выше, чем для монокристалла [11]. Во-вторых, стимулирующим фактором, влияющим на кинетику локального плавления (особенно на его начальной стадии), является также наличие дополнительного деформационного потенциала в имплантированных областях [10,12].

В том случае если рекристаллизация завершается к моменту достижения на поверхности некоторой тем-

пературы локального плавления, в имплантированном полупроводнике образуются вторичные дефекты. Эти дефекты имеют более низкие барьеры зародышеобразования жидкой фазы, чем дефекты исходного монокристалла [3,7]. Как показали наши эксперименты, это также приводит к более раннему плавлению в имплантированных областях кремния.

Таким образом, квадратная форма локальных областей плавления в правой части образца (рис. 1, *a*) определяется по существу формой проимплантированной ячейки, а не анизотропией скорости плавления, как это имеет место в монокристаллическом полупроводнике.

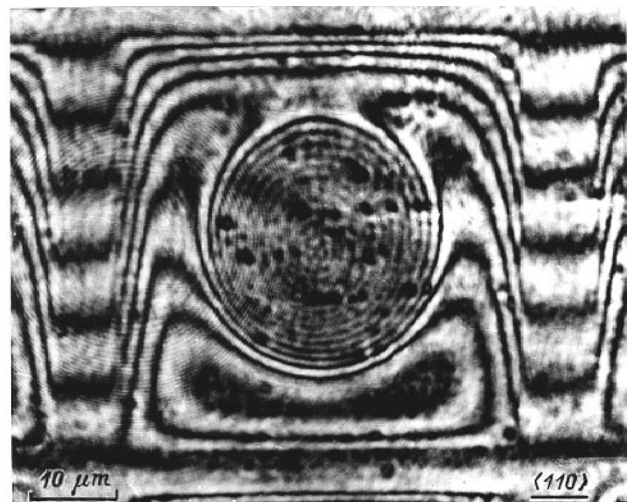


Рис. 2. Микрорельеф поверхности аморфной ячейки, подвергнутой импульсному световому облучению в режиме локального плавления (на рис. 1, *a* эта область отмечена стрелкой).

Отсутствие "случайных" локальных областей плавления на участках монокристаллической сетки (рис. 1, *a* правая часть) объясняется оттоком тепла из этих участков на рост областей плавления, которые зарождаются в аморфной ячейке на более ранней стадии светового импульса. В результате этого не обеспечивается выполнение условия перегрева, необходимого для зарождения локального расплава в монокристаллической области [3,7].

На рис. 2 приведена рекристаллизованная локальная область плавления, сформированная на аморфной ячейке. Фотография сделана на интерференционном микроскопе МИИ-4 при освещении образца излучением He-Ne лазера ЛГ-75 с длиной волны $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$. Видно, что в результате слияния отдельных локальных областей расплава сформировалась единая достаточно четкая область плавления. Рельеф наблюдаемой области плавления близок к профилю классической локальной области плавления на монокристаллическом кремнии [3].

Таким образом, основываясь на вышеописанном принципе, используя ионную имплантацию в сочетании с фотолитографией, на поверхности кремния можно формировать рельефную периодическую двумерную решетку локальных областей плавления с микронным шагом.

Работа выполнена в рамках проектов, финансируемых ГКНТ (проект № 140/57/2) и РФФИ (проект № 94-02-03620).

Список литературы

- [1] Емельянов В.И., Коротеев Р.И., Яковлев В.В. // Опт. и спектр. 1987. Т. 62. Вып. 5. С. 1188–1190.
- [2] Вейко В.П., Имас Я.А., Либенсон М.Н. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1985. Т. 49. № 6. С. 1236–1239.
- [3] Heinig K.-H. // Proc. I Intern. Conf. on Energy Pulse Modification of Semiconductors and Related Materials. Pt 1. Dresden: Zentralinstitut für Kernforschung, 1985. P. 265–279.
- [4] Celler G.K., Robinson M.D., Trimble L.E., Lishner D.J. // Appl. Phys. Lett. 1983. Vol. 43. N 9. P. 868–870.
- [5] Usenko A.Y. // J. Materials Sci. 1993. Vol. 4. P. 89–92.
- [6] Фаттахов Я.В., Хайбуллин И.Б., Баязитов Р.М. и др. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 16. С. 1474–1478.
- [7] Фаттахов Я.В., Васильева Т.Н., Хайбуллин И.Б. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. Вып. 2. С. 47–53.
- [8] Correr L., Pedulli L. // Rad. Eff. 1982. Vol. 63. N 1–4. P. 187–190.
- [9] Поут М., Фоти Г., Джекобсон Д.К. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками. М.: Машиностроение, 1987. 424 с.
- [10] Авакянц Л.П., Ивлев Г.Д., Образцова Е.Д. // ФТГ. 1992. Т. 34. Вып. 11. С. 3334–3337.
- [11] Meyer J.R., Krueger M.R., Bartoli F.J. // J. Appl. Phys. 1980. Vol. 51. N 10. P. 5513–5522.
- [12] Tsu R., Paeslen M.A., Sayers D. // J. Non-Cryst. Solids. 1989. Vol. 114. N 1. P. 199–201.